

ZÁRÓJELENTÉS

az "Atommagok egzotikus bomlásai, állapotai és szimmetriái" c. OTKA-témáról

Az elvégzett munkánk döntő része a „Kutatás munkaterve”-ben leírtakat követte, a kisebb eltéréseket részben az időközben a szakirodalomban megjelent eredmények, részben pedig a saját vizsgálataink előre nem látható belső fejlődése kényszerítette ki. Beszámolónkban a [x] típusú hivatkozások a zárójelentés publikációs listájában szereplő sorszámot jelölik.

I. A közelmúlt legérdekesebb magfizikai felfedezései közé tartozik az egzotikus bomlásmódok megtalálása. Ma már a hagyományos tankönyvekben leírt alfa-, béta- és gamma-sugárzás mellett nem csak szén, szilícium, és más könnyű izotópok spontán emissziója ismeretes, hanem nehezeke is, mint például a molibdéniumé. Az ilyen folyamatokat alapvetően meghatározó magszerkezeti kérdés: milyen fűrtösödése (klaszterizációja) lehetséges a bomló állapotnak.

Ezt két természeti törvénynek, nevezetesen az energia-minimum elvének és a Pauli-féle kizárási elvnek az együttes hatása szabja meg. A probléma energetikai viszonyait számos kutatócsoport vizsgálja, és e téren szisztematikus számolások is végezhetők. A Pauli-elv figyelembe vétele azonban csak mikroszkopikus módszerekkel (vagyis a nukleonok egyenkénti kezelésével) lehetséges, ami annyira bonyolult, hogy csak a legkönnyebb magokra kivitelezhető. Talán legjelentősebb eredményünknek azt tekintjük, hogy kidolgoztunk, és alkalmazni kezdtünk egy olyan közelítő módszert, mely széles körben használhatónak tűnik, ugyanakkor mikroszkopikusan van megalapozva, tehát azokban a tartományokban, ahol a teljesen mikroszkopikus modellek alkalmazhatók, az eredményei részletesen ellenőrizhetők.

A gyakorlati kérdés az, hogy egy adott magállapotban, melynek elméleti leírását a héjmodell (vagy átlagtérelmélet stb.) adja, milyen klaszterizáció megengedett. Könnyű magok esetében az SU(3) szimmetria segítségével egy jól alkalmazható kiválasztási szabályt lehet megfogalmazni, ami a mikroszkopikus szerkezetet szondázva szolgáltatja a választ. Közepes és nehéz magokban azonban az SU(3) szimmetria nem érvényes. A megoldást e szimmetriafogalom általánosítása jelenti. A kvázidinamikai (vagy effektív) szimmetria, amit héjmodell-vizsgálatok kapcsán vezettek be, a kvantummechanika talán legáltalánosabb szimmetriája. A fogalom megalkotói kidolgoztak egy módszert, melynek révén nagyon megnyúlt deformáció esetében megadhatók a magállapotot jellemző effektív kvantumszámok. Mi általánosítottuk az eljárásukat belapult alak és kis deformáció esetére is [2,18,38], így szisztematikus alkalmazásra nyílt lehetőség azáltal hogy a kvázidinamikai szimmetriára alapozva fogalmazhatunk meg kiválasztási szabályt.

A magszerkezet-kutatásnak egy másik izgalmas problémája az egzotikus alakú magállapotok tanulmányozása. Az előzőekben ismertetett módszerünk lehetőséget ad annak felderítésére is, hogy ezek az egzotikus állapotok milyen klaszterizációt engednek meg. Megvizsgáltuk [16,22,23,26,36] ezt a kérdést néhány olyan könnyű mag (36Ar, 40Ca, 56Ni) esetében, melyeknek kísérletileg megtalálták a szuperdeformált állapotát (a hiperdeformált állapotukra pedig elméleti jóslat létezik). Szintén megvizsgáltunk néhány olyan nehéz magot [34], melyek különös figyelmet keltettek (252Cf, 232Th). Az összes lehetséges bináris klaszterizációt szemügyre vettük, de kiterjesztettük a módszert ternáris konfigurációkra is [27,37]. Eredményeinket összevetettük energetikai számolásokkal is. Bebizonyosodott, hogy: 1. a Pauli-elv és az energiaminimum-elv hatása gyakran ellentétes, tehát pusztán energetikai megfontolás alapján (ami gyakori a szakirodalomban) nem következtethetünk a lehetséges klaszterizációkra. 2. Az alapállapot környékén rendszerint az aszimmetrikus, míg az erősen

megnyúlt állapotokban a szimmetrikus klaszterizáció lehetséges. 3. Ugyanaz a klaszterizáció előállhat egy mag alap-, szuperdeformált és hiperdeformált állapotában, ellentétben számos korábbi konklúzióval. Ilyen esetben a különbség a klaszterek térbeli elhelyezkedéséből fakad, amit a korábbi vizsgálatok túlságosan leegyszerűsítő modell-feltevéseik miatt nem mutattak (a Pauli-elv, és a deformált klaszter alakjának és irányának nem pontos tekintetbe vétele folytán).

II. A szimmetriák nemcsak oly módon tehetnek jó szolgálatot, hogy segítségükkel a soktest-probléma különböző modelljeinek közös tartalmát kutatjuk fel, amint az az előzőekben szerepelt, hanem azáltal is, hogy nagy mennyiségű kísérleti adathalmazt rendszerezhetünk általuk. E vonatkozásban az egyik legérdekesebb szimmetria a szuperszimmetria, ami bozonikus és fermionikus szabadsági fokokat kapcsol össze. A magspektroszkópiában ez azt jelenti, hogy páros és páratlan tömegszámú atommagokat ír le egységes keretben. A magfizikában a szuperszimmetriát először a kvadrupólus kollektivitás kapcsán vezették be, vagyis a szuperpartner részecskék a kvadrupólus rezgés fononja, mint bozon, és a nukleon, mint fermion. Vizsgáltuk ilyen fajta szuperszimmetria érvényességét, és úgy találtuk, hogy az $U(6/12)$ szuperszimmetria jól leírja a ^{74}Sr és ^{73}As atommagok spektrumát (közös sémában) [3,8].

Nemrégiben egy újfajta szuperszimmetria fogalmát vezettük be a magspektroszkópiába, ami a dipólus kollektivitáshoz kötődik [Eur.Phys.J. A12(2001)305,1,21]. Ilyen fajta mozgást végez két klaszter egymáshoz képest. E szimmetria segítségével szomszédos, páros ill. páratlan tömegszámú atommagok hasonló klaszterizációját (például törzs + alfa-részecske) írhatjuk le egységesen. Elsőként a ^{20}Ne és ^{19}F alfa-spektrumát tanulmányoztuk az $U(4/12)$ modell keretében. Most kiterjesztettük vizsgálatainkat az $A=18$ -as magokra is [4,10,19]. Az elektromágneses átmeneteiket, valamint a nukleon-átadó reakciók valószínűségét tanulmányoztuk. Eredményeink szerint a szuperszimmetriára alapozott egységes leírás elfogadható egyezést ad a kísérleti adatokkal [29]. A klaszterspektrumok egyöntetű tárgyalása mellett e munka módszertani szempontból is figyelemre méltó, hiszen két (azonos) fermion tartalmazó rendszert korábban semmilyen szuperszimmetrikus magmodellben nem vizsgáltak.

Ugyancsak mi vezettünk be korábban egy másik összetett szimmetriát, ami alkalmas különféle rendszerek együttes leírására. Ez a sokcsatornás dinamikai szimmetria, melynek révén egy atommag többféle klaszterizációját foglalhatjuk közös keretbe. Eredetileg ezt a szimmetriát empirikus megfontolások alapján vezettük be. Ebben a formájában alkalmas volt arra, hogy az a különböző konfigurációk energiájának várható értékei között kapcsolatot teremtsen, de nem volt világos, hogy mi ennek a szimmetriának a pontos matematikai háttere és fizikai tartalma. Újabb vizsgálataink [20,33] feltárták, hogy egy, a különböző klaszterkonfigurációk hátterében meghúzódó többklaszter-konfiguráció dinamikai szimmetriájára vezethető vissza a probléma. Például: két különböző bináris konfigurációt összekötő kétcsatornás szimmetria visszavezethető egy, ezeket meghatározó ternáris konfiguráció dinamikai szimmetriájára. Meghatároztuk ennek a szimmetriának a csoportszerkezetét. Ennek alapján a sokcsatornás dinamikai szimmetria ugyanúgy jellemezhető, mint a magszerkezet más dinamikai szimmetriái: egy részecskecsoportok alkotta csoportlánccal, nevezetesen: a Hamilton-operátor egy ilyen lánc invariáns operátoraival írható fel.

III. Spektroszkópiai adatok részletes leírását adtuk további szimmetria-megfontolások alapján.

Egy egyszerű egyparaméteres formulával közelítettük 180 p- és sd-héjú atommag legalacsonyabb, az alapállapottal ellentétes paritással rendelkező gerjesztett állapotának energiáját. Ez a séma [30] azon a feltételezésen alapul, hogy az említett energiakülönbséget a héjgerjesztési kvantum és a kvadrupólus-kvadrupólus kölcsönhatás alakítja ki, mivel az egyéb, például impulzusmomentum-függő tagok járuléka kicsi a legalsó állapotok esetén. A kvadrupólus-kvadrupólus tag hatását SU(3) szimmetriát feltételezve lehet kiszámítani. Kimutattuk, hogy az egyszerű formula igen jól közelíti a kísérletileg megfigyelt energiakülönbséget. Az eljárás helyességét alátámasztja a rendelkezésre álló kvadrupólus-momentumok analízise is.

A spektroszkópiai faktor egy olyan fizikai mennyiség, ami kvantitatív módon jellemzi egy konkrét állapotnak (vagyis annak hullámfüggvényének) egy adott klaszterkonfigurációhoz való hasonlatosságát. Értelemszerűen, egy ilyen mennyiséget csak mikroszkopikusan lehet pontosan meghatározni. Mivel azonban a mikroszkopikus módszereknek (bonyolultságuk miatt) erősen korlátozott az alkalmazhatósága (reménytelen például a száztest-probléma egzakt megoldása) ezért nagy szükség volna e mennyiség félig mikroszkopikus, félig fenomenologikus meghatározására, vagyis olyan módszerre, ami öröklí a mikroszkopikus fogalom legfontosabb sajátosságait, de mégis csak gyakorlatilag kivitelezhető számításokat követel meg. Lépéseket tettünk egy ilyen módszer kidolgozása érdekében [17,25,39]. Nevezetesen: a spin-izospin térbeli SU(4) és a valódi tér SU(3) dinamikai szimmetriájára alapozva egy félig fenomenologikus közelítő eljárást javasoltunk, melyben a mikroszkopikusan származtatott spektroszkópiai faktor egyes (könnyen számolható) részeit megtartjuk, másokat pedig fenomenologikus formulával közelítünk. Ily módon sikerült jól közelítenünk a teljesen mikroszkopikus úton származtatott (alfa-részecske) spektroszkópiai faktorokat.

További spektroszkópiai kutatásainkról adnak számot az [5,9,12,24] munkák.

IV. A fázisátmenetek valójában a végtelen szabadsági fokú rendszerek jellemző sajátosságai, az utóbbi időben mégis különös figyelmet keltettek olyan véges rendszerekkel kapcsolatban is, mint az atommagok. Megfigyelhetők benne a termodinamikai fázisátmenetekre emlékeztető jelenségek is, de egy másik fajta, nagyon érdekes fázisátmenetről is szokás beszélni, ez pedig az alak fázisváltozása. A mag (egyensúlyi állapotában) lehet gömbölyű, vagy deformált (és a deformált persze sokféleképpen lehet az). A kvantummechanika szerint egy gömb nem foroghat, de rezeghet, a deformált alakok pedig tudnak forogni is és rezegni is. Ezek az alapvető viselkedésformák felelnek meg a fázisoknak, és a mérhető fizikai mennyiségek (például energia) ugrásszerű változása (valamely, a rendszert jellemző fontos paraméter – rendparaméter – függvényében) definiálja a fázisátmenetet. A magok kvadrupólus kollektivitásával kapcsolatban az ilyen irányú vizsgálatok már régóta folynak, de különösen megélénkültek az utóbbi időben.

Az egyik izgalmas új fejlemény ezen a téren a fázisátmenetek érdekes szabályszerűségével kapcsolatos, és ennek kapcsán egzaktul megoldható modellek egész családját tanulmányozták. (Számos publikációban ezt a szabályszerűséget szimmetriának nevezik, de ez fogalmilag különbözik az eddig említett szimmetriáktól.) A dolog jelentőségét az adja, hogy (paramétermentes) jóslatokat szolgáltat kísérleti adatokra.

Mi az atommagok kvadrupólus típusú kollektív mozgását leíró Bohr-féle Hamilton-operátor egzakt megoldását lehetővé tevő potenciált konstruáltunk és ezt alkalmaztuk különféle magalak-fázisoknak megfelelő atommagok leírására, illetve az e fázisok közötti átmeneteket

jellemző ún. kritikus ponti viselkedés vizsgálatára. A potenciál egy hatodrendű anharmonicitást tartalmazó oszcillátor volt, amelynek megoldásai zárt alakban felírhatók a legalsó néhány állapotra. E modell konkrétan a szférikus és az ún. gamma-instabil alakfázisokhoz tartozó atommagok, illetve az ezek közötti átmenetnek megfelelő atommagok leírására bizonyult alkalmasnak. E modellel leírtuk a ^{134}Ba mag spektroszkópiai jellemzőit [13], és rámutattunk a modell alkalmazhatóságának további lehetőségeire [11,28].

A magok fűrtösödése révén keletkező molekulaszerű állapotokkal kapcsolatban hasonló jelenségek szintén vizsgálhatók. Ezt a fajta kutatást a [31] munkánkkal elsőként végeztük. Kétklaszter-rendszereket tanulmányoztunk, nulla, egy és két nyitott héjú (belső szerkezettel rendelkező) példákat választva. Két modellt alkalmaztunk, melyeknek azonos volt a csoportszerkezete (ebből adódóan a bennük szereplő kölcsönhatások), de az egyik nem volt tekintettel a Pauli-elvre (fenomenologikus modell), míg a másik igen (félmikroszkopikus modell). Mindkettőben elsőrendű fázisátmenetet találtunk a rotációs és vibrációs tartomány között. Talán még érdekesebb azonban az a felismerésünk, hogy az $\text{SU}(3)$ kvázidinamikai szimmetria érvényes marad mindkét esetben az analitikus megoldást jelentő dinamikai szimmetria határesetétől egészen a kritikus pontig (volt rá eset, hogy még azon túl is). Ez a jelenség (a kvadrupólus kollektivitással kapcsolatban a legutóbbi időkben tett felfedezéssel együtt) arra mutat, hogy egy szimmetria egy egész fázist jellemez (gyakorlati támaszt nyújtva annak a törekvésnek, mely a fázist a szimmetriával definiálja).

V. Általános módszertani vizsgálatokat végeztünk a szimmetriákkal kapcsolatban.

Megvizsgáltuk a kvantummechanikai leírás egy lehetséges általánosítását [35]. Nevezetesen az elmélet algebrai szerkezetének kiterjesztését tanulmányoztuk egy egyszerű modell keretében. A kvantummechanikai modelljeinknek Lie-algebrai szerkezete van, ami alatt azt értjük, hogy a fizikai mennyiségeket reprezentáló operátorok a felcserélési relációra, mint műveletre (Lie-szorzásra) nézve zárt halmazt alkotnak. A kvantumalgebrai kiterjesztés a kommutációs reláció általánosítása révén tágabb algebrai szerkezetet enged meg, aminek a Lie-algebrai (kvantummechanikai) leírás a határeset. (Fizikai hatása miatt ezt az általánosítást kinematikai szimmetriasértésként is szokták említeni.) Azt kívántuk kideríteni, hogy az algebrai szerkezet deformálása által áthidalható-e az a szakadék, ami a kvantummechanikai leírásban az egzaktul megoldható határesetek (dinamikai szimmetriák) között van. A válasz nemlegesnek bizonyult, szemben az irodalomban megfogalmazott egyes várakozásokkal. Az analitikus megoldással történő áthidalás még abban az esetben is lehetetlennek bizonyult, ha megengedtük a tetszőleges komplex deformációs paramétert, ami már önmagában is súlyos értelmezési nehézségekre vezet. Ráadásul az általános deformációs paraméter nem vezetett semmilyen javulásra a fizikailag megengedett paraméterek esetéhez képest.

A kvantummechanikai soktest-problémában fellelhető szimmetriafajtákat és szimmetriasértéseket tanulmányozva javaslatot tettünk egy olyan módszerre, melynek alapján sokféle szimmetria egységes szempontból osztályozható [6,7]. Konkrétan az időfüggetlen Hamilton-operátorok által kormányzott rendszerek szimmetriáit vizsgáltuk, aminek sok példáját találjuk a magszerkezeti kutatásokban, de számos más területen is. Úgy találtuk, hogy az operátornak és a sajátvektor-készletének alkalmas szimmetria-definícióját választva a geometriai, dinamikai, dinamikailag sérült, spontán sérült, parciális, kinematikailag sérült és kvázidinamikai szimmetriák egyszerű és áttekinthető rendbe állíthatók [14,15,32].